

604P083/W000

(19)日本国特許庁 (JP)

(12)公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-263639

(43)公開日 平成8年(1996)10月11日

(51) Int. Cl. ⁶	識別記号	序内整理番号	F 1	技術表示箇所
G06T 1/00			G06F 15/62	420 A
13/00			H04N 1/387	101
H04N 1/387	101		G06F 15/62	340 D

審査請求 未請求 請求項の数6 O L (全17頁)

(21)出願番号	特願平8-50540
(22)出願日	平成8年(1996)3月7日
(31)優先権主張番号	401396
(32)優先日	1995年3月9日
(33)優先権主張国	米国(US)

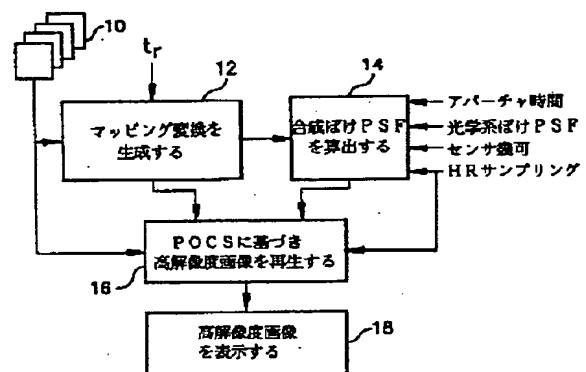
(71)出願人	591264544 イーストマン・コダツク・カンパニー アメリカ合衆国、ニュー・ヨーク・146 50、ロチエスター、ステイト・ストリー ト・343
(72)発明者	アンドリュー・ジェイ・バッティ アメリカ合衆国 ニューヨーク州 ロチエ スター クリッテンデン ウェイ 298
(72)発明者	エム・イ・プラヒム セザン アメリカ合衆国 ニューヨーク州 ロチエ スター アービング ロード 71
(74)代理人	弁理士 吉田 研二 (外2名)

(54)【発明の名称】一連の低解像度画像から高解像度画像を生成する方法及び装置

(57)【要約】

【課題】 画像の再生において、エイリアシング、ぼけ、ノイズなどの影響を完全に解決するのが困難である。

【解決手段】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する装置において、各低解像度画像のマッピング変換が生成される(12)。このマッピング変換により、各低解像度画像の画素が高解像度画像の位置にマップされる。このマッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対し、合成された点拡がり関数(P S F)が算出される(14)。算出された合成P S Fを用いて、凸集合(POCS)への射影により、低解像度画像から高解像度画像が生成される(16)。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する方法であり、以下のステップを含む。

- 各低解像度画像のマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップするステップと、
- 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対する、合成された点拡がり関数 (P S F) を算出するステップと、
- 前記合成ぼけ P S F を用いて、凸集合への射影 (P O C S) により、低解像度画像から高解像度画像を生成するステップと、
- 前記高解像度画像を表示するステップ。

【請求項2】 請求項1に記載の方法において、マッピング変換を生成するステップは、以下のステップを含む。

- 低解像度画像の1つを基準画像として選択するステップと、
- 各画素における、前記基準低解像度画像とそれ以外の各低解像度画像との間の相対運動を説明するマッピング変換を推定するステップと、
- 基準画像以外の各低解像度画像の画素に対して、推定されたマッピング変換の妥当性をテストし、有効なマッピング変換を示すステップと、
- 低解像度画像から高解像度画像への有効なマッピング変換のそれぞれを定めるステップ。

【請求項3】 請求項1に記載の方法において、前記合成 P S F を算出するステップは、以下のステップを含む。

- 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対し、高解像度画像に関する有効サンプリングアーチャを計算するステップと、
- 前記有効サンプリングアーチャの P S F を計算するステップと、
- 光学 P S F を決定するステップと、
- 各画素の計算された P S F を光学的 P S F と合成し、各画素についての合成された P S F を生成するステップ。

【請求項4】 請求項1に記載の方法において、P O S C によって高解像度画像を生成する前記ステップはさらに以下のステップを含む。

- 低解像度画像の1つを、高解像度画像の多数の画素に内挿して、高解像度画像の推定値を生成するステップと、
- 有効なマッピング変換を有する低解像度画像のそれにおける各画素に対し、前記高解像度画像の推定値を以下の方法により改良するステップ、(1) 低解像度画像の1つにおける1画素を選択し、(2) 前記選択された画素の合成 P S F を、高解像度画像の現在の推定値

に供給することにより、高解像度画像から計算された画素値を生成し、(3) 前記選択された画素値と計算された画素値との差を求め、その差の大きさが所定の閾値より大きい場合にはその誤差を高解像度画像の現在の推定値に逆射影 (back project) する、

- 高解像度画像の前記改良された推定値を、許容可能な範囲にクリップするステップと、
- 上記第2のステップと第3のステップを、停止基準が満たされるまで繰り返すステップ。

【請求項5】 一連の低解像度ビデオイメージから高解像度ビデオシーケンスを生成する方法であり、請求項1に記載の方法を前記一連の低解像度ビデオイメージに複数回適用して、高解像度画像のビデオシーケンスを生成する方法。

【請求項6】 一連の低解像度モーション画像から高解像度画像を生成する装置であり、以下を含む。

- 一連の低解像度モーション画像を生成する原画生成手段 (source)、
- 前記一連の低解像度画像を受信し、高解像度画像を生成する画像生成装置であり、(1) 各低解像度画像に対するマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップする手段、(2) 前記マッピング変換を用いて、各低解像度画像の各画素に対して合成された点拡がり関数 (P S F) を算出する手段、(3) 前記ぼけ P S F を用いて、凸集合への射影 (P O C S) により、低解像度画像から高解像度画像を生成する手段と、を含む画像生成装置、及び
- 前記高解像度画像を表示する表示装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】 本発明は、ディジタル画像処理に関する。より詳細には、ぼけ (blur) やノイズの問題を有し、任意の格子 (arbitrary lattice) 上にアンダーサンプリングされた (under-sampled) 一連のモーション画像 (motion image) から高解像度スチル画像 (still image) を得る技術に関する。

【0002】

【従来の技術】 本発明は、任意の時空的格子上にアンダーサンプリングされ、ぼけやノイズによる質の劣化が見られる複数のモーション画像 (すなわち相対変位を含む複数の画像) から高解像度のスチル画像を再生する方法及び装置に関するものである。前記複数の低解像度劣化モーション画像は、時間的に連続して動作する電子スチルカメラによって得られた特定シーンに関する一連のスチル画像でもよいし、ビデオ信号からデジタル化されたフレームでもよい。

【0003】 上記のような低解像度画像は、通常、散在する空間格子 (すなわち、サンプリング格子) 上にアンダーサンプリングされている。これは、散在するポイントの集合上でカラー チャネルをサンプリングするカラー

フィルタアレイが存在すること、及びインターレース、あるいはこれらのいずれかに起因する。さらには、このような画像にはぼけ及びノイズの問題がある。ぼけの原因としては、以下に述べる事項のすべてあるいはそのいずれかが考えられる。すなわち、センサ積分 (sensor integration) 、シーンとカメラの相対運動、ノンゼロアーチャ時間、及び焦点のぼけたレンズである。一方、撮像センサ、及びデジタル化処理と量子化処理がノイズを発生させる。ここでは、これらの欠陥を 1 つでも有する画像を低分解能画像と称することにする。

10

【 0 0 0 4 】

【発明が解決しようとする課題】複数の低解像度画像が供給される場合、例えば良質のハードコピープリントを生成するなどの多様な目的のために、より高品質のスチル画像の生成がしばしば望まれる。生成されたスチル画像は、好ましくは入力された画像の格子より密である標準矩形格子上に、多数のサンプルを有することにより、エイリアシングの影響を低減し、さらにぼけやノイズの問題を排除したものでなければならない。

【 0 0 0 5 】米国特許第 5, 341, 174 号 (クーハ他) には、次のような画像生成方法が開示されている。すなわち、相対運動情報に基づいて、隣接画像からのサンプルを選択された画像にマッピング (写像) することにより画像が形成され、その画像のサンプル数及びサンプル密度が高められる。ところが、この特許に開示されているアプローチは、インターレース (飛び越し走査) されたビデオにその適用が限定され、ぼけやノイズによる劣化を考慮していない。したがって、ぼけやノイズによって劣化したデータは、その状態で用いられてしまう。

【 0 0 0 6 】センサにおける積分によって生じるぼけについては、以下の方法でスチル画像を生成することで考慮がなされている。すなわち、「画像強調のためのモーション分析：解像、閉鎖 (occlusion)，及び透明度」

(M. Irani S. Peleg, J. of Visual Comm. and Image Representation, vol. 4, pp. 324-335, 1993 年 12 月)；「仮想ベローズ：ビデオからの高品質スチル画像の編成」 (IEEE Int. Conf. Image Proc., (Austin, TX), 1994 年 11 月)；「画像登録による解像度の向上」 (M. Irani S. Peleg, Graphical Models and Image Processing, vol. 53, pp. 231-239, 1991 年 5 月) に記載の方法である。しかしながら、上記の方法は、アーチャ時間を考慮に入れておらず、運動ぼけ (motion blur) を適切に扱っていない。さらに、上記の方法は、ノイズによる劣化をモデルせず、これを考慮していない。この結果、これらの方法を用いて生成されたスチル画像には、依然として運動ぼけ及びノイズによる劣化の問題が残されている。さらに、これらの方法では、入力される低解像度画像は標準の矩形格子上にサンプルされていると仮定されている。従って、例えば入力画像がイ

10

ンターレースされたビデオから得たものである場合には、これらの画像は、上記の方法を適用するに先立ち、まずデインターレース (すなわち、標準矩形格子上にサンプリングされたプログレッシブ画像に変換) しなければならない。このような工程を行わない限り、上記方法は、インターレースされてない、プログレッシブな入力画像に限定されることになる。

【 0 0 0 7 】 A. M. テカルブ他による「低解像度画像シーケンスからの高解像度画像再生、及び空間変化 (space-varying) 画像復元」 (IEEE Int. Conf. Acoust., Speech, and Signal Proc., (San Francisco, CA), vol. III pp. 169-172, 1992 年 3 月) において説明される高解像度画像の再生方法では、凸集合への射影 (POCS) に基づく方法が用いられている。この方法は、センサ積分によるぼけ、及びノイズに対して考慮している。しかしながら、この方法は運動ぼけに対する考慮がなく、さらに、インターレースされていないプログレッシブな入力画像にその適用が限定されている。

【 0 0 0 8 】

【課題を解決するための手段】本発明の目的の 1 つは、高品質のスチル画像を生成する際に問題となる前記の課題のすべてに対処する方法を提供することである。すなわち、エイリアシング (任意の格子上の空間アンダーサンプリングによる) 、センサのぼけ (センサにおける空間積分、及びシーンとセンサの相対運動がある場合のアーチャ時間における時間積分による) 、光学系ぼけ (焦点のぼけたレンズによる) 、及びノイズ (センサ及び量子化のノイズ) の問題である。

【 0 0 0 9 】本発明の別の目的は、同時モデリングの問題、及びエイリアシング、センサ積分によるぼけ、光学系ぼけ、運動ぼけ、ノイズによる汚染の影響を完全に解決することにある。このように、本発明によれば、高解像度のスチル画像またはシーケンス (連続画面) を生成することができる。

【 0 0 1 0 】本発明の更なる目的は、任意のサンプリング格子上にサンプリングされた低解像度画像から高解像度画像を再生することにある。これは、サンプリング密度を高めることでエイリアシングの影響を低減し、さらに、センサ積分によるぼけの影響、及びノイズ汚染の影響を低減することにより達成される。

【 0 0 1 1 】本発明の更なる目的は、サンプリング密度を高めることでエイリアシングの影響を低減し、さらに、センサ積分によるぼけの影響を低減することによって、任意のサンプリング格子上にサンプリングされた低解像度画像から高解像度画像を再生することにある。

【 0 0 1 2 】本発明の別の目的は、高解像度モードを備えたディジタルスチルイメージカメラにおいて用いることのできる方法を提供することにある。前記高解像度モードは、「バースト」方式を呼び出すことにより動作する。すなわち、相対運動する連続画像が急速に取り込ま

50

れ、これらの画像が、インカメラハードウェアあるいはオフラインソフトウェア／ハードウェア処理能力のいずれかを用いた方法によって処理される。こうして、高解像度のスチル画像が生成される。あるいは、相対運動を含む連続画像を、通常の電子スチルカメラを用いて取り込むこともできる。本発明の別の目的は、ビデオカメラによって捕獲された画像を処理するために用いることのできる方法を提供することにある。本発明により、インカメラハードウェアあるいはオフラインソフトウェア／ハードウェア処理能力のいずれかを用いて、画像を処理し、高分解のスチル画像を生成することができる。生成された高解像度画像は、カラーフィルタアレイ(CFA)に固有の密度より高密度で空間的にサンプリングされ、さらにインターレースされていない。このようなカメラは、例えば、原稿、図面、及び写真の極めて解像度が高いスチル画像の送信が望まれるようなデスクトップビデオ会議システムにおいて有用である。

【0013】上記目的は、本発明により、一連の低解像度モーション画像から高解像度の画像を生成するシステムを供給することによって達成される。前記システムは、低解像度画像のそれぞれに対するマッピング変換を生成し、各低解像度画像の画素を高解像度画像の位置にマップする。このマッピング変換を用いて、合成(combined)点拡がり関数(PSF)が、各低解像度画像の各画素に対して算出される。さらに、合成PSFを用いて、凸集合への射影(POCS)(projection onto convex sets)により、低解像度画像から高解像度画像が生成される。

【0014】本発明は、以下のような効果を有する。入力画像が標準矩形格子上にサンプリングされていない場合には、前処理として、入力を標準矩形格子上で内挿処理しなければならないが、本発明ではこのような前処理を行わなくとも、任意の格子上にサンプリングされている画像を処理することができる。本発明は、凸集合への射影(POCS)に基づく方法を用いて、ぼけ、ノイズ、任意の格子上にサンプリングされた画像の問題を同時に扱う、画像再生方法を展開させている。さらに、本発明は、運動推定(motion estimates)を柔軟に扱うことができる。以下に述べるように、本発明は、運動推定の正確性に適応することができる高解像度画像再生を可能にするものである。

【0015】

【発明の実施の形態】本発明の主要なステップが、図1のフローチャートに示されている。図において、複数の低解像度モーション画像10が、本発明による画像処理方法の入力として示されている。これらの入力低解像度画像の組から、1つの入力画像がユーザによって選択される。選択された画像は基準画像と呼ばれ、この画像を高解像度化したものが再生される。基準画像は、その時係数t₁によって特定されている。

【0016】本発明は、3つの主要な処理ステップを有する。図1に基づき説明する。第1の処理ステップ12では、各低解像度入力画像の画素を、高解像度画像の位置にマップするマッピング変換が供給される。マッピング変換を生成するために、低解像度基準画像に対し、その他の低解像度画像のそれぞれの各画素の運動ベクトル場が推定される。ここで、分数画素精度(fractional pixel accuracy)を有する周知の階層型ブロックマッチング方法などの、運動推定方法を用いることができる。あるいは、米国特許第5,241,608号(1993年8月31日発行、発明者:フォーゲル)に開示されている運動推定方法を用いて、運動ベクトル場を推定することができる。前記ブロックマッチング方法は、局所移動運動モデル(locally translational motion model)に基づいている。または、以下に説明するように、アフィン運動モデルを用いてもよい。アフィン運動モデルは、ある領域内において、移動に加え、ズーム、回転及びせん断(shear)をモデルするものである。

【0017】第2の処理ステップ14では、前のステップ12において生成されたマッピング変換情報と、アバーチャ時間、センサ幾何(geometry)、光学系ぼけ点拡がり関数(PSF)、及び高解像度サンプリング幾何(HR)を用いて、合成ぼけPSFが算出される。これは、運動ぼけと光学系ぼけ、及びセンサにおける積分によるぼけに対処するものである。合成ぼけPSFの計算は、像形成モデル(image formation model)に基づいて行われるが、これについては後に説明する。

【0018】第3のステップ16において、高解像度画像が生成される。このステップでは、合成ぼけPSF、マッピング変換からの運動情報、及び供給された低解像度画像10が、POCSに基づく方法で用いられる。この方法については、「凸射影理論の概観及び画像回復問題へのその応用」(M. I. セザン著、「超顯微法」、1992年発行第40号、55-67ページ)の論文に詳細に説明されている。このステップで再生された高解像度画像は、前記基準画像を高解像度化した推定であり、入力された低解像度画像のサンプリング格子パターンに関わらず、より緻密で、標準矩形のサンプリング幾何上に多数のサンプルを有し、ぼけやノイズによる画質の劣化の問題を排除したものである。つづいて、ステップ18において、生成された高解像度画像は、CRTまたはプリンタなどのディスプレイ装置に表示される。

【0019】低解像度画像は、異なる時点で異なるサンプリングパターンによってサンプリングされることもある。このような場合には、サンプリング格子は、サンプリングパターンにおいて周期的な変化を示す。低解像度の一般的なサンプリング格子パターン、及び高解像度画像が図2に示される。パターン(a)はダイアモンド型の格子を、パターン(c)はインターレースされた格子を示している。パターン(b)及び(d)は、高解像度

画像が再生されたより高密度の格子を示している。図において、白抜きの円は高解像度再生プロセスによって生成された新たなサンプルを示し、黒塗りの円は低解像度画像のサンプリングパターンを示している。図2は有効サンプリング密度の2倍の増加を示しているが。本発明は、必要に応じて、より高い増加率を提供することができる。また、低解像度画像の1つではなく、すべてを連続的に処理することにより、連続した高解像度画像を生成することができる。この際、その都度、画像の1つが基準画像とされる。このような処理は、例えば高解像度ビデオの生成に有用である。

【0020】図3には、本発明の実施に役立つ装置が示されている。ディジタルタイザ22に接続されたビデオカムコーダ/VCR20、ディジタルスチルカメラ24、ディジタルビデオカムコーダ26、ディジタルスキャナ28、またはディスクストレージ30、などの入力装置が、連続するディジタルモーション画像の供給源となる。連続ディジタルモーション画像は、画像処理コンピュータ装置32に供給される。画像処理コンピュータ装置32は、パワーPCなどのコンピュータ34、一般的にSVGAまたはそれ以上の解像度を有するCRTディスプレイ36、及びキーボード38またはマウスなどのオペレータ入力を含む。コンピュータ34は、高解像度画像のハードコピーディスプレイを生成するプリンタ40などの出力装置、画像の継続中の最終表示を記憶する光ディスクなどの記録媒体42、または遠隔ディスプレイに高解像度画像を分配する通信ネットワーク44に接続するリンクなどに接続される。

【0021】複数の低解像度画像がコンピュータ装置32に供給されてCRT36に表示されると、ユーザは、対話方式で、基準画像の対象領域を特定し、解像度の改良処理をその領域に限定することができる。図4は、一連の低解像度画像46、48、50を示している。ここでは、画像48の対象領域52が、高解像度処理に指定されている。この場合、選択された領域を高解像度化したものは、高解像度サンプリング幾何上に再生され、その結果が低解像度画像の格子上にダウンサンプリングされ、前記対象領域において、元の画素値と置き換えられる。図4の絵では、人の顔が対象領域52を形成している。この場合、結果として得られた画像では、高解像度で顔の詳細を見ることができる。また、ユーザは選択された対象領域52に対応する領域を視覚的に認定するともできる。この場合、低解像度画像全体ではなく、これらの認定領域だけが処理されるので、コンピュータ操

作における節約となる。

【0022】A. マッピング変換

低解像度画像のそれぞれから基準画像に対する運動が推定され、この結果、M個の低解像度画像に対して、(M-1)個の運動ベクトル場が得られ、これによりマッピング変換が生成される。マッピング変換は、低解像度画像の画素を、高解像度画像のサンプリング位置にマップするためのものである。これについては、図5において示されている。最も簡単なケースとしては、低解像度画像46から基準画像48までの運動を、空間的均一移動としてモデルすることができる。しかしながら、実際には、このモデルは最適ではないことが判明した。そこで、不均一な移動運動を推定するための、階層的ブロックマッチング方法、及びアフィンモデル及び推定量に基づく方法が、運動ベクトル場の推定に、より効果的に用いられている。

【0023】低解像度画像46、48、50、53は、すでに矩形格子上に得られない限りは、運動推定のために、まず、矩形の低解像度の格子上に双線形に内挿される。例として、ダイアモンド形の低解像度入力格子54、及びこれに対応する低解像度の矩形格子56が図6に示されている。基準画像の内挿された値は運動推定のためにのみ用いられ、その後は破棄され、POCSに基づく高解像度再生処理においてはその推定値に置き換えられる。運動ベクトルは、低解像度画像のそれぞれの実際の画素に対して推定され、その結果、(M-1)個の運動ベクトル場推定値が得られる。

【0024】ブロックマッチング方法の場合、その運動は、局所的移動(locally translational)であると仮定される。他の変換効果が小さい場合には、このような近似(approximation)が大変効果的となる。M.ビアリングによる「階層的ブロックマッチングによる変位推定」(Proc. SPIE Visual Communications and Image Processing '88, pp.942-951, 1988)に記載の階層的ブロックマッチング方法(HBM)を用いて、不均一の運動場が推定される。ここで用いられているマッチング基準は、測定ブロック間の平均絶対差(MAD)である。階層の各レベルにおいて、対数型のサーチが用いられる。

【0025】5レベルのHBMを実施するのに用いることのできる好適なパラメータ値が表1に示されている。ここで、一番左の列に示されているのが階層レベル数であり、レベル1が最も低い解像度レベルを示している。

【0026】

【表1】

レベル	最大変位		ウィンドウ サイズ		フィルタ サイズ		ステップ サイズ	SSF	精度
	横	縦	横	縦	横	縦			
1	31	31	128	128	10	10	32	8	1
2	15	15	64	64	10	10	16	8	1
3	7	7	64	64	5	5	8	4	1
4	3	3	28	28	5	5	4	4	1
5	1	1	12	12	3	3	3	2	0.25

水水平方向／垂直方向最大変位は、対数型サーチの第 1 歩ステップにおいて用いられる変位である。水水平方向／垂直方向測定ウィンドウサイズは、MAD が計算されるウィンドウのサイズである。フィルタの水平方向／垂直方向のサイズは、ガウスフィルタのサポートを特定するもので、分散 (variance) はサポートサイズの 2 分の 1 に設定されている。ステップサイズは、運動推定が算出される基準画像の隣接する画素間の水平方向及び垂直方向の距離である。サブサンプリング係数 (SSF) は、測定ウィンドウ上の MAD を算出する場合に用いられる水平方向及び垂直方向のサブサンプリングである。推定の精度は、低解像度の矩形格子のサンプリング期間に関するものである。なお、これらパラメータのすべての単位

$$g(x_1 + c_1 + c_2 x_1 + c_3 x_2, x_2 + c_4 + c_5 x_1 + c_6 x_2, t) = g(x_1, x_2, t, \dots) \quad (1)$$

これらのパラメータ $c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6$ を推定するために用いることのできる技術については、J. バーゲン、P. パート、R. ヒンゴラーニ、S. ベレグによる、「2成分画像運動を推定するための3フレーム対数」(IEEE Trans. Pattern Anal. Intel., vol. 14, pp. 86-896, 1992年9月発行) に説明がある。この推定方法では、空間的及び時間的な導関数 (derivatives) を推定する必要がある。空間導関数は、各画素を中心とした 5×5 のウィンドウに適合する (fit) 2-D 2 次多項式最小二乗法を用いて推定される。時間導関数は、各画素における 2 点有限前進差分 (2-point finite forward difference) を用いて算出される。これらの導関数を推定するに先立ち、 11×11 の画素均一ぼけ (pixel uniform blur) を用いて画像をぼけさせ、ノイズの影響を低減する。

【0028】カラーイメージの場合には、輝度ドメインにおいて運動が推定される。さらに、その運動情報を用いて、供給された低解像度画像の原色チャネル (例えば、赤、緑、青) がそれぞれ処理される。したがって、マッピング変換を形成するための運動推定に先立ち、RGB から輝度及び 2 つの色票 (例えば、YUV) への変換が、低解像度画像に提供される。

【0029】B. 合成 PSF のモデリング及び計算
合成 PSF の計算は、像形成ぼけモデルに基づく。以下においては、まず、このモデルについて説明する。このモデルを用いて合成 PSF が算出される。

10 は、低解像度の矩形格子の空間サンプリング期間に関するものである。(すなわち、低解像度矩形格子に対する、画素精度 0.25 の改善は、HBM の最終レベルにおいて行われている。)

(回転、せん断 (シアー)、及びズームによって起こる) 有効な非移動マッピング変換は、上述のブロックマッピング技術を用いて正確にモデルすることができない。この場合は、下式のパラメータ $c_1 - c_6$ によって決定されるグローバルアフィン変換を用いることにより、このようなマッピング変換を生じさせる画像間運動 (inter-image motion) をモデルするのが好ましい。

【0027】

【数 1】

【0030】まず、入力された低解像度画像を、特定の基準時間 t_0 において、連続線形シフト変数 (LSV) ぼけ関係によって、実際の高解像度画像に関連づけるモデルについて説明する。この目的のため、まず、像形成モデルについて説明する。この形成モデルに前述のマッピング変換を組み入れることにより、所望の LSV 関係が合成ぼけ PSF によって表わされる。次に、離散化 (discretization) についての説明が示される。これにより、離散化された高解像度画像が、対応する離散的 LSV 関係によって、観測された低解像度画像に関連づけられる。そして、これが離散的合成ぼけ PSF で表される。最後に、次の高解像度画像再生ステップに用いられる合成 PSF を算出する実際的な方法が供給される。

【0031】像形成モデル

本発明において用いられる像形成モデルが図 7 に示されている。図において、入力信号 $f(x_1, x_2, t)$ は、連続ドメインにおける実際の高解像度イメージを示している。この高解像度イメージが離散的推定を求めるべき画像である。低解像度センサの物理的サイズの影響、すなわちセンサ領域上の積分によるぼけ、及び光学系装置のぼけが、図 7 の第 1 段 60 においてモデルされる。高解像度画像 $f(x_1, x_2, t)$ は、センサの形状を表す核 $h_1(x_1, x_2, t)$ と光学的ぼけ核 $h_2(x_1, x_2, t)$ の双方と合成される。これらはともに時間の関数であるが、ここでは、これらをアーチャ時間において一定であると限定する。こうして、光学的

ぼけとアーチャサイズを、画像ごとに変化させることができる。

【0032】アーチャ時間の影響は、時間ドメイン積分器 (time-domain integrator) によって、図7の第2段62においてモデリングされている。その出力は、以下の式によって表される。

【0033】

【数2】

$$g_2(x_1, x_2, t) = \frac{1}{T_a} \int_{t-T_a}^t g_1(x_1, x_2, \tau) d\tau, \quad (2)$$

ここで、 T_a は、センサアーチャ時間を示している。なお、ここで、最初の2つの段60と62は、交換が可

$$g_2(m_1, m_2, k) = g_2(x_1, x_2, t) \Big|_{[x_1 x_2]'} = V_s [m_1 m_2 k] \quad (3)$$

ここで、 V_s はサンプリング格子を特定する行列を示し、「 $'$ は転置作用を示している。最終的なモデリングステップ66において、低解像度センサによる付加的なノイズがサンプルされたビデオ信号に付加される。

【0036】運動を含むモデル

次に、前記像形成モデルに運動モデルを組み込んで、固定された任意の時間段階 t_r における、低解像度画像と所望の高解像度画像との望ましいLSV関係を確立する。この t_r を適当に設定することによって、単一の高解像度スチル画像、または、連続する高解像度画像からなる高解像度ビデオ画像を再生することができる。

【0037】運動モデルが像形成モデルに供給されると、図7の最初の2つの段60及び62を組み合わせて、単一のLSV関係を形成することができる。ここで、まず、運動を次の式において考えることとする。

【0038】

【数4】

$$f(x, t) = f(M(x, t, t_r), t_r) = f(x_{t_r}, t_r), \quad (4)$$

上式において、 x は (x_1, x_2) を示している。M

$$g_1(x, t) = \int h_1(x - M^{-1}(x_{t_r}, t, t_r)) f(x_{t_r}, t_r) J(M)^{-1} dx_{t_r}, \quad (6)$$

ここで、 M^{-1} は逆変換を表し、 $J(M)$ はMのヤコビアンを表し、 $| \cdot |$ は行列式作用素 (operator) を表している。式(6)から、モデルの第1段はLSVオペレーションに変換されており、時間 t_r における高解像度画像に影響していることが明らかである。この事実を反映するために、次式(7)が、センサ幾何の影響、光学ぼけ、及び相対運動をモデルする、合成LSVぼけ点拡がり関数 (PSF) を示すようにした。

【0041】

【数8】

$$h_1(x; x_{t_r}; t, t_r) = h_1(x - M^{-1}(x_{t_r}, t, t_r)) | J(M) |^{-1} \quad (7)$$

この式による影響が図8に示されている。図において、左の絵は、時間 t における画像処理を示したものであ

能である。これは、第1の段60が空間的な線形シフト不変 (LSI) であり、第2の段62が時間的なLSIであるためである。

【0034】図7の第3の段64では、任意の空間-時間格子 Δ を用いて低解像度サンプリングをモデルする。この段の出力は、 $g_1(m_1, m_2, k)$ によって示されている。従来から、関数引数数 (function argument) として現れる整数値 m_1, m_2, k は次の式において解釈される。

【0035】

【数3】

(x, t, t_r) は、位置 x 及び時間 t における強度の位置を、時間 t_r におけるその位置に関連づけるマッピング変換である。この式は、運動軌道 (motion trajectories) に沿った強度維持を周知の推定方法で表したものである。

$h_1(x, t) = h_1(x, t_r) = h_1(x, t) * * h$

(x, t_r) とすることによって、モデリングの第1段の出力は、下式のように表すことができる。

【0039】

【数5】

$$g_1(x, t) = \int h_1(x - \chi) f(\chi, t_r) d\chi \quad (5)$$

変数

【数6】

$$x_{t_r} = M(\chi, t, t_r)$$

を変化させ、式(4)を用いることにより、式(5)は以下のようにになる。

【0040】

【数7】

る。ここでは、センサ素子のアーチャ68は画像に組み付けられて (imposed) いる。右側の絵は、時間 t_r における同じ画像処理を示している。時間 t から t_r までに、アーチャ68に供給されるマッピング変換は、画像70に供給されるマッピング変換の逆数である。式(6)を、LSV形式で書き直すと、

【数9】

$$g_1(x, t) = \int h_1(x; x_{t_r}; t, t_r) f(x_{t_r}, t_r) dx_{t_r} \quad (8)$$

のように表される。

【0042】ここで、第2モデリング段は、以下の式で表すことができる。

【0043】

【数10】

13

$$g_2(x, t) = \int_{t-T_d}^t \int h_1(x; x_{t_r}; \tau, t_r) f(x_{t_r}, t_r) dx_{t_r} d\tau \quad (9)$$

積分の順序を変えることにより、上式は以下のようになる。

14

$$g_2(x, t) = \int h_2(x; x_{t_r}; t, t_r) f(x_{t_r}, t_r) dx_{t_r} \quad (10)$$

ここで

$$h_2(x; x_{t_r}; t, t_r) = \int_{t-T_d}^t h_1(x; x_{t_r}; \tau, t_r) d\tau. \quad (11)$$

である。

【0045】このように、モデリングの最初の2つの段が単一のLSVシステムに合成され、時間 t_r における連続する高解像度画像に作用する。これにより、観測された低解像度イメージを、時間 t_r における連続する高

【0044】

【数11】

$$g(m_1, m_2, k) = \int h_2(m_1, m_2; x_{t_r}; k, t_r) f(x_{t_r}, t_r) dx_{t_r} + v(m_1, m_2, k). \quad (12)$$

上式において、 h_2 () は有効 LSV ぼけ PSF であり、整数引き数 (integer arguments) m_1, m_2, k は式 (3) においてと同一の解釈を有する。

解像度画像の式で、以下のように書き表すことができる。
【0046】
【数12】

【0047】離散化 (discretization)

式 (12) における LSV ぼけ関係を離散化し、観測された低解像度画像を、実際の高解像度画像 $f(x_1, x_2, t_r)$ に

離散化したものに関連づけることが望ましい。そこで、この型の離散的重ね合わせ推定 (discrete superposition summation) を、以下の式のように表すこととする。

$$g(m_1, m_2, k) = \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2, t_r) h_{t_r}(n_1, n_2; m_1, m_2, k) + v(m_1, m_2, k), \quad (13)$$

ここで、連続イメージ $f(x_1, x_2, t_r)$ は、2-D 格子

(n_1, n_2, t_r) を離散化したものに関連づけることとする。

【数14】

$$\Delta_{t_r}$$

の単位格子 (ユニットセル)

【数18】

$$U_{t_r}$$

として用いることのできる物理的大きさを有していると仮定される。このように、焦点面の全体的な空間が、高解像度センサによって完全に覆われている。

【数15】

$$\Delta_{t_r}$$

【0048】

【数13】

$$U_{t_r}(n_1, n_2)$$

上に、高解像度センサによってサンプルされ、 $f(n_1, n_2, t_r)$ を形成する (n_1, n_2) は

の項は、 n_1, n_2 によって特定された位置にシフトしたユニットセル (3) を示すものとして用いられている。このような定義により、さらに $f(x_1, x_2, t_r)$ は

【数16】

$$\Delta_{t_r}$$

【数20】

$$U_{t_r}(n_1, n_2)$$

を適当に選択することによって、 $f(n_1, n_2, t_r)$ のサンプリングを空間-時間格子上に形成することができる。

上でほぼ一定であるという仮定に基づき、式 (12) は以下のように表すことができる。

【数17】

$$\Delta_{t_r}$$

【0051】

【数21】

$$g(m_1, m_2, k) = \sum_{(n_1, n_2)} f(n_1, n_2, t_r) \int_{U_{t_r}(n_1, n_2)} \int h_2(m_1, m_2; x_{t_r}; k, t_r) dx_{t_r} d\tau + u(m_1, m_2, k). \quad (14)$$

式 (13) と (14) を比較することにより、次のことが明らかである。

【0052】

$$h_r(n_1, n_2; m_1, m_2, k) = \int_{U_{l_r}(n_1, n_2)} \int h_2(m_1, m_2; x_{l_r}; k, t_r) dx_{l_r}, \quad (15)$$

ここで、整数引き数 m_1, m_2, k, n_1, n_2 は式 (3) においてと同様に解釈される。

【0053】図9には、離散LSV PSFの定式の1例が、矩形の高解像度格子

【数23】

A_{l_r}

上に示されている。図において、モーション（運動）が完全に移動であること、点 (m_1, m_2) 73を中心とした正方形の低解像度センサアバーチャ68が用いられていること、及び、光学的なぼけはないこと、が仮定とされている。 (x_1, x_2) 空間は、時間 t_r におけるセンサ焦点面である。図において、焦点面は、シフトされた高解像度サンプリングユニットセル

【数24】

$U_{l_r}(n_1, n_2)$

69によって覆われている。アバーチャ時間 T_r の間に、低解像度センサアバーチャ68によって「一掃」された焦点面の領域が、鎖線71によって示されている。式 (15) において特定された離散LSV PSFは、領域

【数25】

$U_{l_r}(n_1, n_2)$

69上に「存在した」(dwelled)低解像度センサ68の所定面積をある時間の間計算し、同時にアバーチャ開放時間におけるその位置から、アバーチャ閉鎖時間における位置73まで移動させることによって形成される。なお、式 (15) に示されている結果は、センサアバーチャ

$$x_{l_r} = M(x, t, t_r) = x + x_{b_k} + v_k(t - (t_k - T_a)), \quad (16)$$

このとき、速度 v_1, v_2 及び v_{b_k} ($v_k = [v_1, v_2, v_{b_k}]^T$) は、アバーチャ時間 T_r にわたり一定であること、 $(t_k - T_a)$ はアバーチャの k 番目の開放の時間であること、

【数29】

x_{b_k}

はアバーチャの k 番目の開放における相対的初期位置を示していること、が仮定されている。

【0057】

【数30】

x_{b_k}

の量は、時間 t_1 及び t_r の関数である。光学的ぼけが

$$h_2(x; t, t_r) = \frac{1}{T_a} \int_0^{T_a} h_2(x + x_{b_k} + v_k \tau; t, t_r) d\tau \quad (17)$$

ここで、アバーチャ反応を、次式

【数22】

チャ68によって一掃された部分71と、高解像度サンプリング領域

【数26】

$U_{l_r}(n_1, n_2)$

69の間の単純重複領域を特定しない。

【0054】合成PSFの算出

式 (15) によって求められるぼけ関数

【数27】

$h_r(\cdot)$

を算出するための実際的な方法を説明する。このために、2つのケースを示す。第1のケースでは、移動式運動が仮定されている。第2のケースでは、一般的な画像運動が考慮されている。第2のケースを説明するためには、まず一般的な近似が与えられ、これにより、ぼけ計算方法が得られる。この計算方法は、第1の移動式運動のケースと同様に確立される。この近似に関し、アフィン変換及び射影変換の運動モデルの特定の方法が示される。

【0055】1) 移動式運動

移動式運動の場合において、アバーチャの k 番目の開放において有効な（すなわち、時間 t_1 における k 番目の低解像度画像を獲得するための）区分的一定速度運動パス (piece wise constant velocity motion paths) を、次式のように定義する。

【0056】

【数28】

ある時間無視され、PSF

【数31】

$h_2(x, x_{l_r}; t, t_r)$

がLSIであり、

【数32】

$h_2(x - x_{l_r}; t, t_r) = h_2(x, x_{l_r}; t, t_r)$

が定義され、式 (7) と式 (11) が適用されると、次式が得られる。

【0058】

【数33】

【数34】

17

$$h_d(x_1, x_2) = \begin{cases} \frac{1}{\Delta M_1 \Delta M_2}; & -\frac{\Delta M_1}{2} < x_1 < \frac{\Delta M_1}{2} \text{ and } -\frac{\Delta M_2}{2} < x_2 < \frac{\Delta M_2}{2} \\ 0; & \text{else.} \end{cases} \quad (18)$$

18

によって与えられた 2-D 「矩形 (rect)」 関数であると仮定すると、 h' は図 10 に示すような線図を用いて算出することができる。座標

【数 35】

$$x + x_{b_k}$$

は、時間 $\tau = 0$ における、図 10 のライン 7 8 のスタート点 7 6 を設定する。積分はライン 7 8 を追従して $\tau = 10 T_a$ における終点 8 0 に到達する。この結果は、アパートチャ 6 8 に交差する線分 7 8 の長さを表している。

【0059】 ほか h' をさらに説明するために、

【数 36】

$$v_{1,k} T_a > \Delta M_1 \text{ 及び } v_{2,k} T_a > \Delta M_2$$

である場合を考えるとする。この場合、点拡がり関数

【数 37】

$$h'_2(x_1 - x_{1,b_k}, x_2 - x_{2,b_k}) =$$

$$K \left(\left(v_{2,k} \left(x_1 + \frac{\Delta M_1}{2} + v_{1,k} T_a \right) \right) - v_{1,k} \left(x_2 - \left(\frac{\Delta M_2}{2} - v_{2,k} T_a \right) \right) \right) \quad (19)$$

(領域 2 内のすべての (x_1, x_2) に対して)

このとき、K は、離散 P S F

【数 40】

$$h_r$$

を正規化することにより説明することのできるスケーリング定数である。

【0061】 式 (15) の離散 P S F

【数 41】

$$h_r$$

は、図 11 に示される領域

【数 42】

$$U_{tr}(m_1, m_2)$$

6 9 の体積を積分することにより算出される。この領域

6 9 の中心 8 2 は、

【数 43】

$$x = x_s(m_1, m_2, k) + x_{b_k} - x_{tr}(m_1, m_2)$$

に位置する。ここで、

【数 44】

$$h_r(m_1, m_2; m_1, m_2, k) * *_{m_1, m_2} h_{rk}^d(m_1, m_2) \quad (20)$$

ここで、

【数 49】

$$h_{rk}^d(m_1, m_2)$$

は k 番目の低解像度画像の焦点ぼけを離散的に示したものであり、「 n_1, n_2 」は変数 (m_1, m_2) 上の 2 -

50

$$h'2(x - x_{b_k})$$

(便宜上シフトが用いられている) を、図 11 に示すように、 (x_1, x_2) 面内で複数の領域に区分することができる。図に示されるこれら 7 つの領域のそれぞれにおいて、

【数 38】

$$h'2(x - x_{b_k})$$

の値は x_1 および x_2 における一次方程式によって示されている。例えば、番号 1 をつけられた平行四辺形の領域では、 $h'2$ の値は一定である。2 番の台形領域においては、 $h'2$ は次式を用いて求められる。

【0060】

【数 39】

$$x_{tr}(m_1, m_2)$$

は

【数 45】

$$x_s(m_1, m_2, k)$$

と同様に定義されている。このように、

【数 46】

$$h_r(x_1 - x_{1,b_k}, x_2 - x_{2,b_k})$$

は、領域 6 9 において、その位置が (m_1, m_2) 及び (n_1, n_2) によって決定されている

【数 47】

$$h_2(x_1 - x_{1,b_k}, x_2 - x_{2,b_k})$$

の体積を求ることによって算出される。

【0062】 続いて、離散近似を用いて、次式の合成を実行することにより、光学的ぼけ $h_r(x, t)$ を考慮することができる。

【0063】

【数 48】

D 離散合成を示している。このようにして光学的ぼけを考慮に入れることにより、ぼけ P S F

【数 50】

$$h_{tr}$$

は、ほぼ $x, (m_1, m_2, k)$ の領域内では、ほぼ L S I であるとの仮定を立てる。画像が極度の非移動式運

動を行っていない限り、これは妥当な仮定であるといえる。光学的ぼけを、式(20)のように扱うのは好適である。これは、光学的ぼけが考慮されていないときには【数51】

 h_{tr}

を簡単に計算することができ、さらに式(20)における合成を簡単に実施することができるからである。好適な実施においては、光学的ぼけPSFは、高解像度サンプリング格子によって表された、統一変数(unity variance)および 5×5 画素サポートを有するガウスと等しく設定される。

【0064】2) 一般的運動

$$h_2(x; x_{tr}; t, t_r) = \int_{t-T_a}^t h_1(x - M^{-1}(x_{tr}, \tau, t_r)) J(M(x_{tr}, \tau, t_r))^{-1} d\tau \quad (21)$$

同図は、積分時間の間に、 $t - T_a$ 8.4 から $t - T_a$ 8.6 まで

【数53】

 x_{tr}

を通過して移動する際の、変換されたぼけ核 $h_1(\cdot)$ を示している。そして、 $h_1(\cdot)$ の値は、ヤコビアン及び $h_1(\cdot)$ の振幅によって重みづけられた。

【数54】

 x_{tr}

上の「ドエル」時間となる。式(21)の計算は難しいが、これは式(21)の移動核 h_1 が積分期間の間連続的に変換しているためである。しかしながら、すでに指摘したように、アバーチャ時間におけるこの変換の非移動成分は小さいと想定されている。この影響については、図12において、

【数55】

$$h_1(M^{-1}(x_{tr}, t, t_r))$$

$$J(M(M(x, t - T_a, t_r), \tau, t_r))^{-1} \int_{t-T_a}^t h_1(x - M^{-1}(x_{tr}, \tau - T_a, t_r)) d\tau \quad (22)$$

このとき

$$t(x, \tau) = \frac{T-\tau}{T} x + \frac{\tau}{T} M^{-1}(M(x, t - T_a + \tau, t_r), t - T_a, t_r) \quad (23)$$

であり、 T は 2 つの連続フレーム間の時間である。

【0067】この近似を用いて、空間的に均一で、時間的に区分的な一定速度移動運動の場合におけるぼけ算出にも同じ手順が用いられる。ただし、この場合には、各点 x において、ぼけは、図10に示されている矩形関数 6.8 に与えられた適当な変換によって算出される。要約すると、変換が、均一で一定の移動によって決定される場合には、近似は正確なぼけ算出となる。変換がアフィン変換である場合には、ヤコビアンは

【数59】

 x_{tr}

ぼけを計算するための上記方法は、例えばアフィン変換または射影変換によって説明されるより複雑な運動の場合にも発展させることができる。このような展開は、以下の概念に基づいている。すなわち、時間 t 、と t_r 、との間の運動による変換は重要であるかもしれないが、ぼけ形状に影響する変換の非移動成分はアバーチャ時間の間は小さいものである。このような概念が図12に示されている。図12は、式(11)に示された計算を図で表したものであり、式(11)は次式のように書き直される。

【0065】

【数52】

8.6 上に重畠された(superimposed) 関数

【数56】

$$h_1(M^{-1}(x_{tr}, t - T_a, t_r))$$

8.4 の鎖線によるアウトラインによって示されている。式(21)により、この近似は以下の 3 つを仮定する。

(1) ヤコビアン重み付けは一定である、(2) 変換

【数57】

$$M(x_{tr}, t - T_a, t_r)$$

はアバーチャ時間を通じて維持される(すなわち、この関数は、 τ が変化するときにのみ移動する)、(3) 2 つの連続するフレーム期間の移動パス、すなわちアバーチャ時間内の移動パスは線形である。この近似により、式(21)は次式のように書き換えられる。

【0066】

【数58】

とともに変化しない。しかし、アバーチャが開放した状態で、ヤコビアンを一定時間にわたって一定になるよう近づけた。さらに、この移動は、一定速度であると仮定されているが、これは必ずしもそうではなくともよい。射影運動の場合には、近似は、アフィン変換の場合と同じ効果を有し、ヤコビアンは $h_1(\cdot)$ の空間ぼけサポートにわたって一定である、とのさらなる近似を有する。

【0068】C. 高解像度画像の再生

合成ぼけPSF

【数60】

21

 h_r

、低解像度画像から基準画像までの運動ベクトル場推定、及び高解像度サンプリング格子が供給され、POCSの方法に基づく下記の技術を用いて高解像度画像が再生される。POCSでは、望ましい画像分布は、高解像度画像に対し、数学的ベクトル空間、例えばP次元のベクトル空間N1画素×N2行 (P=N1×N2) の要素であると仮定されている。POCS方法は、このベクトル空間内の、実際の高解像度画像を含む閉凸制約数集合 (closed convex constraint sets) の定義を要する。これらの集合の数学的交わり (intersection) が実際の高解像度画像を含んでいる。これは、実際の高解像度画像がこれらの集合のそれぞれに含まれているからである。実際の高解像度画像の推定が、これらの制約数集合の交わりにおける1点として定義され、すでに周知のように、任意初期推定をこの制約数集合に連続的に射影す

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k) = \left\{ y(n_1, n_2, t_r) : \left| r(y) (m_1, m_2, k) \right| \leq \delta_0 \right\}, \quad (24)$$

ここで、次式

$$r(y)(m_1, m_2, k) = g(m_1, m_2, k) - \sum_{n_1, n_2} y(n_1, n_2, t_r) h_r(n_1, n_2; m_1, m_2, k), \quad (25)$$

は、制約数集合の、任意の要素 y に関する残差である。ここでは、これらの集合を、データ一定制約数集合 (data consistency constraint sets) と呼ぶ。量 δ_0 は、実際の画像を集合

【数63】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

の要素とする統計的信頼度を反映する先駆境界 (priori bound) である。 $r^{(1)}(m_1, m_2, k) = v$ (m_1, m_2, k) (v は実際の高解像度画像を示す) であるので、 $r^{(1)}(m_1, m_2, k)$ の統計は、 v (m_1, m_2, k) の統計と同一である。このように、境界 δ_0 はノイズ処理の統計から決定され、実際の画像 (すなわち、理想解) は、特定の統計的信頼度の範囲内にある集合の要素となる。例えば、ノイズが、標準偏差 σ を有するガウス分布を有する場合、 δ_0 は $c\sigma$ と等しく設定される。このとき、 $c\sigma$ は適当な統計的信頼境界によって決定されている (例えば、99%の信頼度に対して $c=3$ である)。

【0072】また、実際には、 δ_0 の値を直接調節することもできる。 δ_0 が増加するにつれ、再生された画像はシャープになるがノイズが多くなる。 δ_0 が減少すると、結果としての再生画像は、ノイズが小さくなるがより平滑になる。詳細な複数の実験により、 δ_0 を0.01と等しく設定した結果、POCS方法を、かなり急速に、十分に良質の画像に収束できた。

22

ることによって決定される。

【0069】核制約数集合に関連して、射影作用素があり、これが前記空間内にあるが集合の外部である任意点を、集合内の最も近接する点にマップする。さらに、緩和された射影作用素 $T = (1 - \lambda) I + \lambda P$; $0 < \lambda < 2$ (I は恒等作用素を示す) が定義されて、交差集合 (intersection set) において推定を求めるのに用いることができる。

10

【0070】高解像度画像の再生における問題を直ちに解決する方法を開発するために、POCSの原理をいかに利用するかについて説明する。ここで、低解像度画像列 $g(m_1, m_2, k)$ の各画素に対し、以下に示す閉じた凸制約数集合を定義する。

【0071】

【数61】

【数62】

【0073】なお、集合

【数64】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

は、低解像度画像のサンプルが有効である空間的位置に對してのみ定義できる。これにより、いかなる任意の低解像度サンプリング格子にも本発明を適用することができる。さらに、集合

【数65】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

は、閉塞 (occlusions) や覆われない領域のない低解像度画像のサンプルに對してのみ定義できる。後者の事実により、本発明は、所定のモーション画像内のシーンの変更に用いることができる。すなわち、制約数集合は、低解像度画像の適当なサンプルに對してのみ定義されている。

【0074】任意数 $x(n_1, n_2, t_r)$ の

【数66】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

への射影 $z(n_1, n_2, t_r)$

【数67】

$$P_{t_r}(m_1, m_2, k) [x(n_1, n_2, t_r)]$$

は、次式のように定義することができる。

【0075】

【数68】

$$\begin{aligned}
 & 23 \quad P_{t_r}(m_1, m_2, k) [x(n_1, n_2, t_r)] = \\
 & \begin{cases} x(n_1, n_2, t_r) + \frac{(r^{(x)}(m_1, m_2, k) - \delta_o) h_{t_r}(n_1, n_2; m_1, m_2, k)}{\sum_{\alpha_1} \sum_{\alpha_2} h_{t_r}^2(\alpha_1, \alpha_2; m_1, m_2, k)}, & r^{(x)}(m_1, m_2, k) > \delta_o \\ x(n_1, n_2, t_r), & -\delta_o \leq r^{(x)}(m_1, m_2, k) \leq \delta_o \\ x(n_1, n_2, t_r) + \frac{(r^{(x)}(m_1, m_2, k) + \delta_o) h_{t_r}(n_1, n_2; m_1, m_2, k)}{\sum_{\alpha_1} \sum_{\alpha_2} h_{t_r}^2(\alpha_1, \alpha_2; m_1, m_2, k)}, & r^{(x)}(m_1, m_2, k) < -\delta_o \end{cases} \\
 & 24 \quad (26)
 \end{aligned}$$

有界エネルギー (bounded energy)、確実性 (positivity)、及び限定サポートなどの更なる制約数を用いて、結果を改善させることができる。次式のような振幅制約

$$C_A = \{x(n_1, n_2, t_r) : \alpha \leq f(n_1, n_2, t_r) \leq \beta\}. \quad (27)$$

ここで、振幅境界は、 $\alpha = 0$ 、 $\beta = 255$ である。振幅制約数集合 C_A への射影 P_A は次のように定義される。

$$P_A[x(n_1, n_2, t_r)] = \begin{cases} 0, & x(n_1, n_2, t_r) < 0 \\ x(n_1, n_2, t_r), & 0 \leq x(n_1, n_2, t_r) \leq 255 \\ 255, & x(n_1, n_2, t_r) > 255 \end{cases} \quad (28)$$

上記の射影が与えられると、高解像度画像

【数 7 1】

$$f(n_1, n_2, t_r)$$

の推定

【数 7 2】

$$\hat{f}(n_1, n_2, t_r)$$

$$\hat{f}_{\ell+1}(n_1, n_2, t_r) = T_A \bar{T} [\hat{f}_\ell(n_1, n_2, t_r)] \quad \ell = 0, 1, 2, \dots \quad (29)$$

ここで、

【数 7 4】

$$\bar{T}$$

は、緩和された射影作用子のカスケード (継続) を示し、集合

【数 7 5】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

の族に射影するものである。高解像度サンプリング格子上に双線形に内挿されたいかなる低解像度画像も、初期推定

【数 7 6】

$$\hat{f}_0(n_1, n_2, t_r)$$

として用いることができる。視覚的な最良の画質を有する低解像度画像を初期化に選択することにより、反復数

【数 7 7】

$$\ell$$

に達する速度を早めることができる。この反復数

【数 7 8】

$$\ell$$

において、視覚的に満足できる高解像度画像が再生される。理論上では、推定がすべての制約数集合の交わり内に存在するまで、この反復は継続する。しかしながら、実際には、反復は、通常、画像品質の視覚的観察などの特定停止基準に従って、または、ある差分測定基準 (difference metric) (すなわち、ノルム L2 を用いた

数集合が用いられる。

【0076】

10 【数 6 9】

【0077】

【数 7 0】

【0078】

【数 7 3】

は、すべての低解像度画像 $g(m_1, m_2, k)$ から反復式に求められる。このとき、制約数集合は、次式のように定義することができる。

【0079】

$$\|\hat{f}_\ell - \hat{f}_{\ell-1}\|$$

30) によって測定された、連続する推定値間の変化が所定の閾値以下に下がったときに、停止する。

【0079】図 13 は上記の方法を図によって説明したものである。合成 LSV ぼけは、現在の高解像度画像 8 の推定値の領域 71、例えば

【数 8 0】

$$\hat{f}_\ell()$$

を、低解像度画像 46、48、53 の 1 つにおける特定画素強度 $g(m_1, m_2, k)$ 90 に関連付ける。統いて、残差項 (residual term)

【数 8 1】

$$r^{(\hat{f}_\ell)}(m_1, m_2, k)$$

が形成される。残差項

【数 8 2】

$$r^{(\hat{f}_\ell)}(m_1, m_2, k)$$

は、(δ_0 によって決定されるある誤差境界内の) 現行の高解像度画像推定値から観測値が形成できたか否か、したがって、その高解像度画像推定値がデータ一定集合

【数 8 3】

25

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

に属するか否かを示すものである。高解像度画像推定値が前記集合内に存在しない場合（すなわち、残差が大きすぎる場合には）、射影作用子

【数84】

$$P_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

はその残差を現行の高解像度画像88推定値（式

【数85】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

10

の加法的項（additive term）上に逆射影（back project）し、集合

【数86】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

に属する高解像度画像の新たな推定値を形成するため、境界 δ_0 内の、観測値 g （ m_1, m_2, k ）を発生させることができた。一定の制約数集合が定義されている低解像度画素90のそれぞれにこれらの射影を行うことにより、式（29）に示された合成射影

【数87】

$$\bar{r}[\hat{f}_r(n_1, n_2, t_r)]$$

を完成させることができる。続いて、振幅制約数集合へ射影することによって、POCS方法の一反復を完成させ、次の推定値

【数88】

$$\hat{f}_{t+1}(\cdot)$$

を生成することができる。

【0080】以下に、POCSに基づいた再生方法の実施の1例を示す。

【0081】1. 基準画像、及び基準時間 t_1 を選択する。

【0082】2. 高解像度格子を特定し、この高解像度格子と、運動推定の目的のために、双線形内挿によって画像値が生成されている低解像度矩形格子との密度の比を決定する。ここでは、この比を r とする。（例えば、図2及び図6に示されている例では、 $r = 2$ である）
3. 運動推定を行う：各低解像度画像 g （ m_1, m_2, k ）を低解像度矩形格子に、空間的双線形的に内挿する；内挿された低解像度画像のそれぞれから、時間 t_1 における内挿された低解像度画像までの運動を推定する；推定運動ベクトルを r によって見積もる。

【0083】4. 運動バスが有効な各画素位置（ m_1, m_2, k ）に対し、式（24）に従って集合

【数89】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

26

を定義する。

【0084】5. 集合

【数90】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

が定義された各位置（ m_1, m_2, k ）に対して、合成ぼけP S F

【数91】

$$h_r(n_1, n_2; m_1, m_2, k)$$

を算出する。

【0085】6. 高解像度画像のサンプリング格子上に低解像度画像を双線形的に内挿した後、視覚的に最良品質を有する低解像度画像に等しい

【数92】

$$\hat{f}_0(n_1, n_2, t_r)$$

を設定する。

【0086】7. 集合

【数93】

$$C_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

20

が定義されているすべての位置（ m_1, m_2, k ）に対し、式（25）に従って残差

【数94】

$$r(\hat{f}_r)(m_1, m_2, k)$$

を算出する；式（26）の射影

【数95】

$$P_{t_r}(m_1, m_2, k)$$

を用いて残差

【数96】

$$r(\hat{f}_r)(m_1, m_2, k)$$

を逆射影（back-project）する。

【0087】8. 式（28）を用いて增幅射影 P_r を行う。

【0088】9. 停止基準が満たされれば、停止する。満たされなければ、ステップ7に戻る。

【0089】停止基準が満たされれば、画像を表示することも、将来の表示に備えて記憶することも、あるいは遠隔表示のために送信することもできる。

【0090】好適な1実施形態に関し、本発明を説明してきたが、当業者であれば、本発明の範囲を逸脱することなく、本発明を変更及び修正することが可能である。

【0091】

【発明の効果】本発明によれば、入力画像が標準矩形格子上にサンプリングされていない場合でも、入力を標準矩形格子上で内挿処理するという前処理を行わなくとも、このような画像を処理することができる。本発明

50

は、凸集合への射影 (POCS) に基づく方法を用いて、ぼけ、ノイズ、任意の格子上にサンプリングされた画像の問題を同時に扱う、画像再生方法を展開させている。さらに、本発明は、運動推定 (motion estimates) を柔軟に扱うことができる。また、本発明は、運動推定の正確性に適応することができる高解像度画像再生を可能にするものである。

【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の主要なステップを示すブロック図である。

【図 2】 低解像度サンプリング格子、及び本発明による高解像度画像のサンプリング格子を示す図である。

【図 3】 本発明を実施する適当な装置を示した概略図である。

【図 4】 連続する低解像度画像、及びこれらの低解像度画像の 1 つにおける選択された対象領域を示す図である。

【図 5】 本発明によるマッピング変換を生成する方法を説明するために有用な図である。

【図 6】 本発明によるマッピング変換を生成する方法を説明するために有用な図である。

【図 7】 本発明による組み合わされた PSF を計算するために用いられる画像フォーメーションモデルを示すブロック図である。

【図 8】 連続画面における低解像度画像の相対運動によるぼけ PSF の有効な変換を示す図である。

【図 9】 移動運動の場合の PSF を示すための図である。

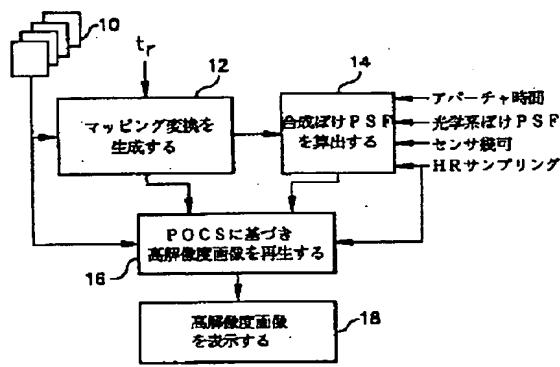
【図 10】 LSI ぼけ関数

【数 97】

$$H_2(x_1, x_2, t, t_r)$$

を算出するための手順を示す図である。

【図 1】



【図 11】

【数 98】

$$H_2(x_1 - x_{1,b_k}, x_2 - x_{2,b_k})$$

の領域区分を示すための図である。

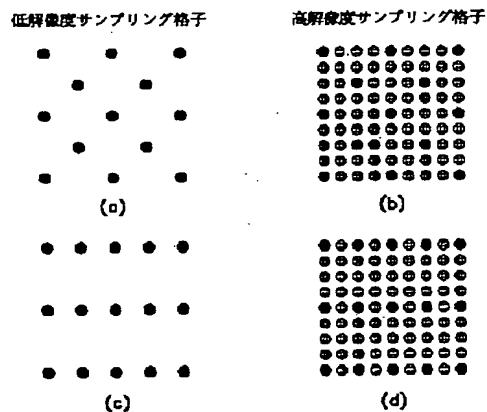
【図 12】 合成された有効ぼけ PSF を算出する際に、アフィン変換に関する遠近運動モデル (perspective motion model) に用いられる近似を示すための図である。

【図 13】 POCSに基づく画像再生方法を説明するための図である。

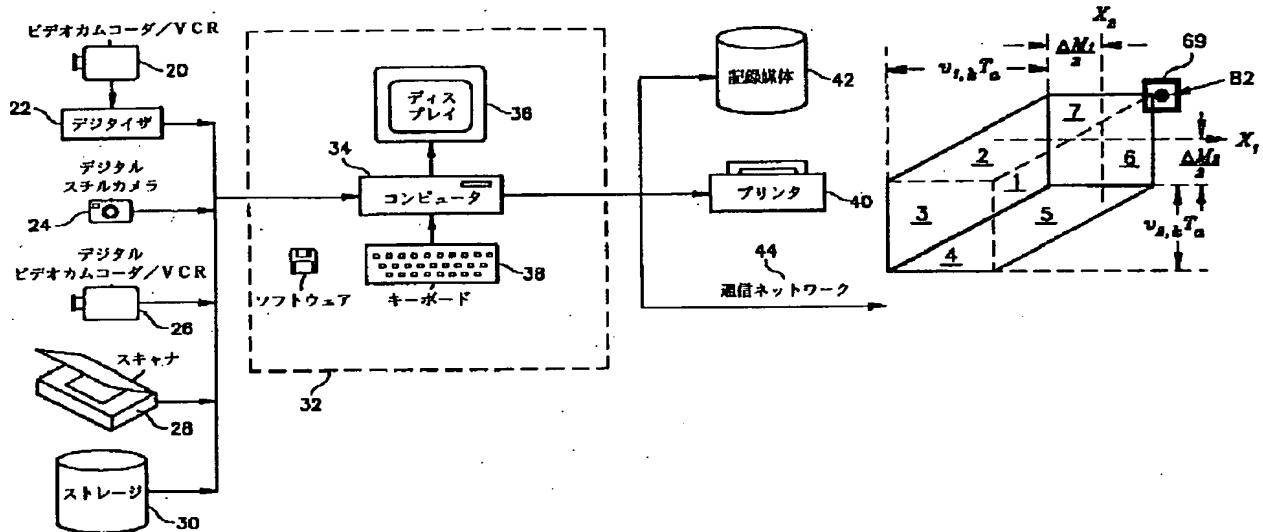
【符号の説明】

10 低解像度画像、12 マッピング変換供給ステップ、14 合成 PSF 算出ステップ、16 高解像度画像生成ステップ、18 高解像度画像表示ステップ、20 ビデオカムコーダ/VCR、22 デジタイザ、24 デジタルスチルカメラ、26 デジタルビデオカムコーダ、28 デジタルスキャナ、30 ディスク記憶装置、32 画像処理コンピュータ装置、34 コンピュータ、36 CRT、38 キーボード、40 プリンタ、42 記憶媒体、44 通信ネットワーク、46, 48, 50 低解像度画像、52 対象領域、53 低解像度画像、54 ダイヤモンド型サンプリング格子、56 矩形サンプリング格子、60 光学系装置ぼけモデル、62 アバーチャ時間モデル、64 低解像度サンプリングモデル、66 付加ノイズモデル、68 センサアバーチャ、69 高解像度サンプリング領域、70 画像、71 センサアバーチャによって一掃された領域、73 センサアバーチャの中心、76 始点、78 ライン (線)、80 終点、82 領域の中心、84 変換されたぼけ核、86 変換されたぼけ核、88 高解像度画像、90 低解像度画像画素。

【図 2】

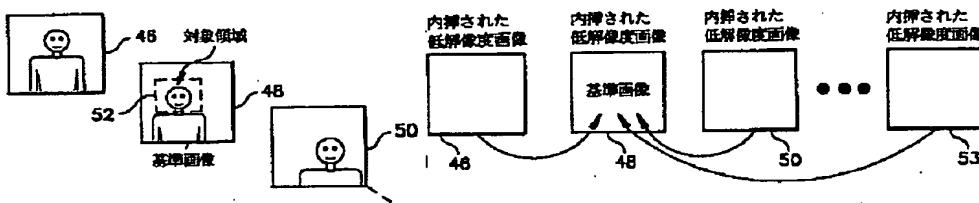


【図 3】

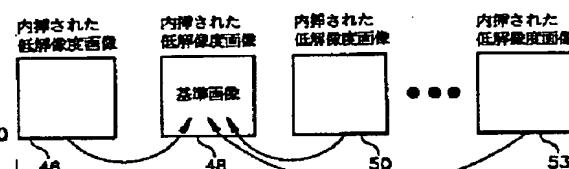


【図 11】

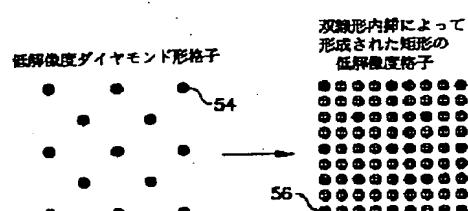
【図 4】



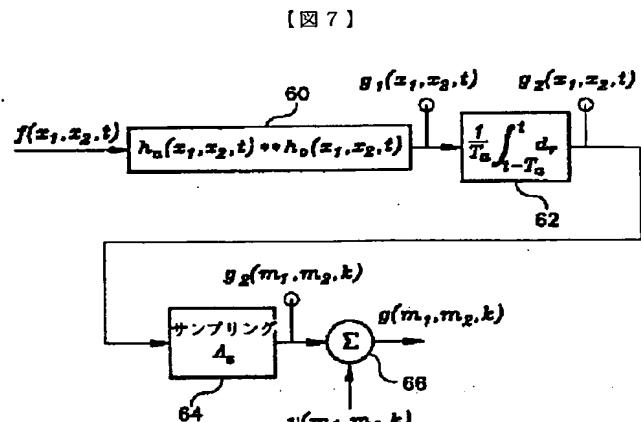
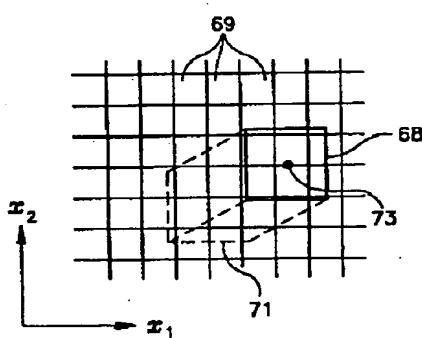
【図 5】



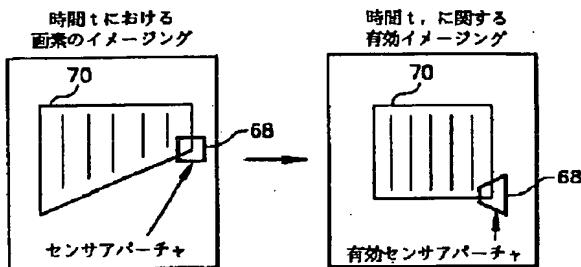
【図 6】



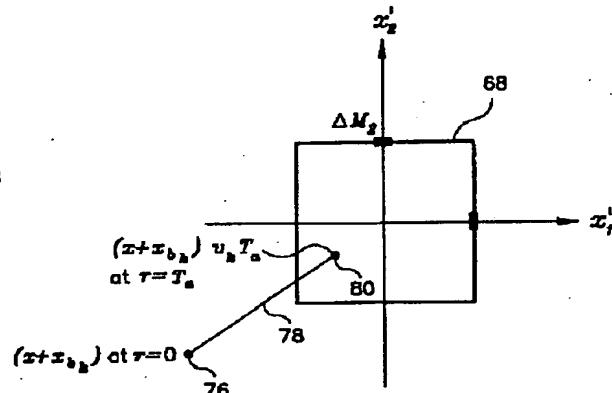
【図 9】



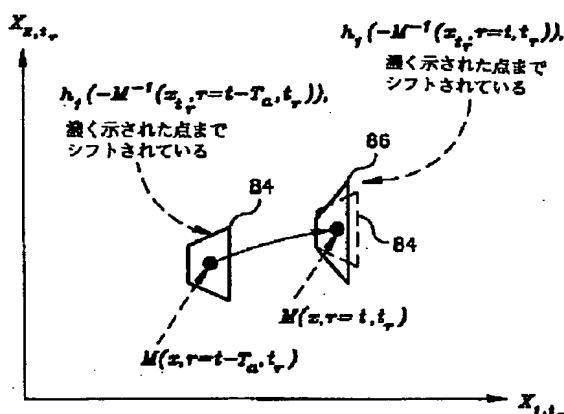
[図 8]



[図 10]



【図 1-2】



【図13】

